

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Studium vlastností transformátorového oleje

Study of the Properties Transformer Oil

Student: Bc. Miroslav Hanák
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.

Ostrava 2009

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Hanák**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: **Studium vlastností transformátorového oleje**
Study of the Properties Transformer Oil

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte vlastnosti a použití transformátorového oleje.
2. Prostudujte vliv oleje na povrchové vlastnosti materiálu transformátoru.
3. Navrhněte metodiku experimentálních prací.
4. Proveďte experimentální zkoušky, jejich vyhodnocení a zpracujte technickou zprávu v rozsahu 30 - 35 stran.

Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, M.: *Technologie povrchových úprav kovů*. Učební texty VŠB – TU Ostrava, 2006. 3. vydání. 156 s. ISBN 80-248-1217-7.

BROCK, T., GROTEKLAES M., MISCHKE, P.: *European Coating Handbook*. Vincentz Verlag, Hannover, Germany, 2000. 410 s. ISBN 3-87870-559-X.

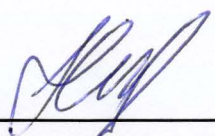
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc.**

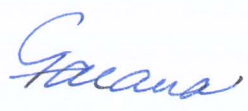
Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009





prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60- školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, в́ п́ріпаде́ за́јму з její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 22.5.2009



Podpis studenta

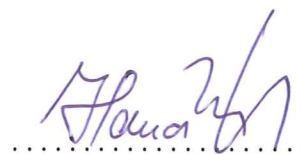
Loučná nad Desnou 21A

788 11 Loučná nad Desnou

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22.5.2009



Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HANÁK, M.: Studium vlastností transformátorového oleje. Ostrava, katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 58s. Diplomová práce, vedoucí Podjuklová, J.

Předložená diplomová práce se zabývá zkoumáním povrchových vlastností a chování izolačního oleje v uzavřených nádobách olejového transformátoru.

V experimentální části práce je provedeno prozkoumání vlastností třech vzorků izolačního oleje, vystavených různým provozním podmínkám uvnitř transformátoru.

Vyhodnocením vzorků izolačního oleje je potvrzena absorpční vlastnost izolačního oleje a potřeba stálé regenerace izolační kapaliny pro bezpečný provoz olejového transformátoru.

ANNOTATION OF THE THESIS

HANÁK, M.: *Study of Properties Transformer Oil.*

The introduced diploma work concerns with examination of surface properties and behaviour of the insulation oil in the closed bowls of the oil transformers.

In the experimental part of work is performed the examination of properties three samples insulation oil exposed different operation conditions inside the transformer.

The evaluation of insulation oil samples is the confirmity of the absorbtion property of the insulation oil and the requirement of keep regeneration of the insulation liquid for the safe operation of the oil transformer.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	9
1 ÚVOD	12
2 VLASTNOSTI A POUŽITÍ IZOLAČNÍHO OLEJE	13
2.1 Izolační oleje a jejich použití	13
2.1.1 Syntetické izolační oleje	14
2.1.2 Minerální izolační oleje	14
2.2 Olejový transformátor	15
2.2.1 Funkce izolačního oleje v transformátoru	15
2.2.2 Omezující faktory izolačního oleje	16
2.3 Navlhnutí olejové náplně a celulózy	17
2.4 Stanovení obsahu vody v transformátorovém oleji	18
2.5 Provozní určení množství vody v transformátoru	18
2.6 Využití Nielsenova rovnovážného diagramu	20
2.6.1 Odhad největší možné provozně přípustné teploty transformátoru ...	20
2.6.2 Odhad požadovaného stupně koncového vysušení transformátoru ...	21
2.7 Jakostní parametry oleje	23
2.7.1 Regenerace transformátorového oleje	24
2.7.2 Vakuový separátor	25
3 VLIV IZOLAČNÍHO OLEJE NA POVRCHOVÉ VLASTNOSTI TRANSFORMÁTORU	26
3.1 Celulóza	26
3.1.1 Degradace celulózové izolace	26
3.2 Měď	27
3.2.1 Koroze kovových částí povrchu uvnitř transformátoru.....	27
4 MECHANISMUS TVOŘENÍ PLYNŮ V IZOLAČNÍM OLEJI	28
4.1 Stanovení obsahu rozkladových plynů rozpuštěných v izolačním oleji	28
4.1.1 Metoda plynové chromatografie	28

4.1.2	Demonstrace rozkladových plynů v transformátorovém oleji	30
5	VLIV IZOLAČNÍHO OLEJE NA FUNKCI TRANSFORMÁTORU.....	32
5.1	Elektrická pevnost izolačního oleje	32
5.2	Obsah vody rozpuštěné v oleji	33
5.3	Kyselost oleje	33
5.4	Ztrátový činitel	33
5.5	Relativní permitivita	34
5.6	Vnitřní rezistivita	34
5.7	Stanovení mezipovrchového napětí na rozhraní olej-voda	34
5.8	Hustota oleje	34
5.9	Plynová chromatografie	34
6	NÁVRH METODIKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ	36
7	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY A JEJICH VYHODNOCENÍ	37
7.1	Vzorky izolačního oleje	37
7.2	Odběr vzorku izolačního oleje	38
7.3	Stanovení vody v oleji přístrojem Coulometr 831	38
7.4	Stanovení průrazného napětí	40
7.5	Určení čísla kyselosti izolačního oleje	42
7.6	Stanovení ztrátového činitele, relativní permitivity, vnitřní rezistivity	44
7.7	Stanovení hustoty izolačního oleje hustoměrem	48
7.8	Stanovení relativního mezipovrchového napětí olej-voda	49
7.9	Stanovení množství inhibitoru v izolačním oleji	51
7.10	Stanovení celkového obsahu plynů v oleji plynovou chromatografií	52
8	ZÁVĚR	56
	SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	57
	SEZNAM PŘÍLOH	58

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

C_{01}	Konstanta 56.1
C_{02}	Hodnota koncentrace alkoholového roztoku KOH
C_{03}	Hodnota slepého pokusu
CH_4	Metan
C_2H_2	Acetylen
C_2H_4	Etylen
C_2H_6	Etan
C_3H_6	Propen
C_3H_8	Propan
C_4H_7	1-Buten
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
C_p	Obsah vody v pevné izolaci [% hm.]
$C_{ppož}$	Obsah vody v celulóze po ukončení sušení [l]
C_{pskut}	Obsah vody v celulóze před započítáním sušení [l]
Cu	Měď
C_w	Obsah vody v oleji [g/t]
ČK	Číslo kyselosti
g/t	Gram na tunu
g/l	Gram na liter
GOhm/m, GΩm	Gigaohm na metr
H ₂	Vodík
H ₂ O	Voda
kg	Kilogram
KOH	Hydroxid draselný
kV	Kilovolt
kV/2,5mm	Kilovolt na 2,5 milimetru
l	Litr
m	Hmotnost celulózové izolace v transformátoru [kg]
mg KOH/g	Miligram hydroxidu draselného na gram vzorku
mg/kg	Miligram na kilogram
ml	Mililitr
mm	Milimetr

mN/m	Milnewton na metr
MV/m	Megavolt na metr
MVA	Megavoltampér
n	Počet měření
N ₂	Dusík
O ₂	Kyslík
PCB	Polychlorované bifenyly
pH	Číslo kyselosti
ppm	Měrná jednotka, částice na milion
s	Směrodatná odchylka [kV]
T ₅₄	Teplota izolačního oleje 54 °C
T ₆₅	Teplota izolačního oleje 65 °C
tgδ	Ztrátový činitel
tgδ ₂₀	Ztrátový činitel tgδ při 20 °C
tgδ ₇₀	Ztrátový činitel tgδ při 70 °C
tgδ ₉₀	Ztrátový činitel tgδ při 90 °C
T _{IS}	Teplota izolačního oleje [°C]
U _p	Průměrné napětí [kV]
U _{pi}	Hodnota průrazného napětí jednotlivých průrazů [kV]
V	Objem vody [l]
V ₁	Objem roztoku KOH použitého k titraci vzorku [ml]
V _a	Variační koeficient [%]
$V_{H_2O/olej}$	Objem jedné kapky vody vyteklé do vzorku ionizačního oleje
$V_{H_2O/vzduch}$	Objem jedné kapky vody vyteklé do vzduchu
V _n	Navážka vzorku izolačního oleje v gramech
°C	Stupeň Celsia
%	Procento
% hm.	Procento hmotnosti
% obj.	Procento objemu
ε, ε _r	Relativní permitivita
ε _{r20}	Relativní permitivita při 20 °C
ε _{r70}	Relativní permitivita při 70 °C
ε _{r90}	Relativní permitivita při 90 °C

μm	Mikrometr
$\mu\text{l/l}$	Mikrolitr na litr
ρ	Vnitřní rezistivita
ρ_{20}	Vnitřní rezistivita 20 °C [$\text{G}\Omega\text{m}$]
ρ_{70}	Vnitřní rezistivita 70 °C [$\text{G}\Omega\text{m}$]
ρ_{90}	Vnitřní rezistivita 90 °C [$\text{G}\Omega\text{m}$]
ρ_{H_2O}	Hustota vody při teplotě měření 20 °C určené z tabulek
ρ_{ol}	Hustota izolačního oleje
σ	Povrchové napětí
σ_m	Mezipovrchové napětí
$\sigma_{H_2O/vzduch}$	Povrchové napětí vody ve vzduchu odečtené z tabulky
Číslo kyselosti	ČK dle ČSN ISO 62 021-1

1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá zkoumáním charakteristických vlastností izolačního oleje ve vysokonapěťových transformátorech. Podrobně se ve studii zabývám jakým způsobem izolační olej ovlivňuje elektrické vlastnosti transformátoru a jaký důsledek změn v izolačním oleji z toho plynou na povrchy součástí uvnitř transformátoru.

Z mé bakalářské práce, kterou uvádím v pramenech diplomové práce je patrné, že vysokonapěťový transformátor je hermeticky uzavřená nádoba ve které je umístěná technologie stroje. Jediná možnost jak sledovat nepřímo změny uvnitř transformátoru je prováděním pravidelné diagnostiky izolačního oleje transformátoru. Z modelového experimentu, který jsem prováděl v bakalářské práci s měděným vodičem, bylo patrné po prozkoumání elektronovým mikroskopem, že k oxidaci na povrchu vodiče v izolačním oleji vůbec nedošlo. Zjistil jsem, že izolační olej vystavený vlivům vzdušné atmosféry rychle oxiduje a dobře absorbuje různé složky atmosféry. Získané poznatky z bakalářské práce hlouběji prozkoumávám experimenty, které uvádím v mé diplomové práci

U vysokonapěťového transformátoru byla provedena dlouhodobá odstávka z provozu. Záměrem mé práce bylo podrobně prozkoumat tři různé vzorky izolačního oleje z tohoto stroje. První vzorek oleje byl odebraný za provozu před odstávkou stroje. Druhý vzorek byl odebraný v průběhu odstávky a třetí vzorek byl odebraný po odstávce za běžného provozu transformátoru. Vyhodnocení studie jsem shrnul v závěru diplomové práce.

2 VLASTNOSTI A POUŽITÍ IZOLAČNÍHO OLEJE

2.1 Izolační oleje a jejich použití

Izolační oleje se používají jako nevodivá náplň v transformátorech a jiných elektrických zařízeních, ve kterých plní funkci izolantu a média pro odvod vznikajícího nadměrného tepla. Izolační oleje jsou vhodné pro zařízení vysokých napětí a výkonů.

Izolační náplně se dělí na:

- Syntetické
- Minerální

Příklady použití izolačních olejů:

- *V kondenzátorech*

Silikonové izolační oleje se používají jako dielektrikum mezi dvěma póly kondenzátoru. Výhodou je velké rozpětí pracovních teplot -70 až 130 °C.

- *V transformátorech*

Vlivem průchodu elektrického proudu cívkami transformátoru vzniká nadměrné teplo. Izolační olej v transformátoru působí jako chladicí médium a zároveň jako izolační kapalina.

- *Ve spínačích, odpínačích*

Používá se jako zhašecí médium. Pracovní kontakty spínače nebo odpínače jsou umístěny v lázni izolačního oleje, kde se zhaší elektrický oblouk při rozpojení elektrického obvodu.

- *Ve vysokonapěťových průchodkách*

Působí jako izolant, který odděluje živou část od části neživé. Průchodka slouží pro vyvedení elektrického napětí z hermeticky uzavřených nádob nebo komor.

- *Kabelové impregnanty*

Kabel olejové konstrukce má měděné nebo hliníkové jádro a papírovou izolaci impregnovanou izolačním olejem. Od používání těchto kabelů je již ustupuje. [12] [15]

2.1.1 Syntetické izolační oleje

Syntetické izolační oleje se používají ve zvláštních případech, kde nelze aplikovat minerální oleje. Například v zařízeních, kde je požadavek na nehořlavost izolační náplně nebo pokud je kladený požadavek na široký rozsah pracovních teplot apod. Syntetické oleje se používají v kondenzátorech, transformátorech, v přístrojích pracujících s velkou diferencí teploty.

Syntetické oleje dělíme:

- Připravené polymerací nenasycených uhlovodíků z krakových plynů
- Chlorované uhlovodíky
- Fluorované uhlovodíky
- Organické étery
- Silikonové oleje

Rozšíření syntetických olejů brání vysoká pořizovací cena vzhledem k olejům minerálním a velká ekologická zátěž na životní prostředí, protože obsahují PCB. [12]

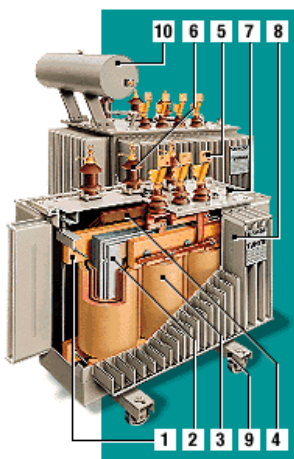
2.1.2 Minerální izolační oleje

Minerální izolační oleje jsou vysoce rafinované sloučeniny uhlovodíků. Základní surovinou ze kterých se vyrábí přibližně 90 % izolačních olejů je ropa. Ropu tvoří přibližně z 98 % uhlovodíky. Zbývá 2 % v ropě tvoří kyslík, síra, dusík, písek, voda a různé organické soli.

Na počátku výroby minerálního oleje se z ropy odstraní hrubé nečistoty, anorganické soli a voda. Po odstranění nečistot se ropa destiluje. Vzniklé olejové destiláty se podle požadavků upravují na tekutý izolant. Hlavním znakem minerálního oleje je vysoká odolnost proti oxidaci. To znamená, že izolační olej má minimálně měnící se fyzikální vlastnosti jak na počátku, tak i po celou dobu jeho životnosti. Chemické složení jednotlivých druhů izolačních olejů je velmi komplikované a z velké části jde o firemní know-how. Obecně lze říct, že minerální olej tvoří směs alifatických, alicyklických a aromatických uhlovodíků s určitým, od rafinačního stupně závislým obsahem kyslíkatých a sirných sloučenin. Hlavním znakem minerálních izolačních olejů je jejich univerzálnost a vlastnost plnit různorodé požadavky. Minerální oleje se používají například jako izolační náplň do transformátorů, spínačů, průchodek atd. [12]

2.2 Olejový transformátor

Pod pojmem transformátor se rozumí netočivý elektrický stroj. Připojím-li na primární cívku transformátoru střídavé napětí stanovené výrobcem, v závislosti na transformačním poměru vznikne na sekundární cívkce stroje nové střídavé napětí. Na sekundární cívkce může vznikat střídavé napětí buď nižší, vyšší nebo stejné vzhledem k napětí na svorkách primárního vinutí. Olejové transformátory se v energetice používají hlavně pro transformaci vysokých výkonů nebo napětí. Vlivem průchodu elektrického proudu vzniká v závitech cívek velké teplo, které je potřeba odvádět. Pro olejový transformátor je charakteristické, že izolační kapalina tvoří hlavní předěl mezi vodivými částmi různého potenciálu a uzemněnými částmi transformátoru. Vinutí a magnetický obvod celého stroje je ponořený v izolačním oleji. Celé zařízení je polohmeroticky uzavřeno v nádobě transformátoru. Na obr.1 je zobrazena konstrukce olejového transformátoru. [12]



Obr. 1. Transformátor [19]

1. Ukotvení transformátoru
2. Železné jádro transformátoru
3. Vinutí transformátoru
4. Přepínač odboček
5. Nízkonapěťové průchodky
6. Vysokonapěťové průchodky
7. Pouzdro snímače teploty
8. Polohermetická nádoba transformátoru
9. Podvozek transformátoru
10. Konzervátor transformátoru

2.2.1 Funkce izolačního oleje v transformátoru

Vlastnosti transformátorového oleje se nesmí měnit nejen v původním stavu, ale i po celou dobu životnosti stroje. Během své funkce je izolační olej vystavený řadě různých faktorů, které mají vliv na funkční vlastnosti i na jeho složení. Postupně dochází k omezování žádoucích vlastností až to té míry, kdy musím izolační olej vyměnit nebo regenerovat. Ztráta funkčních vlastností izolačního oleje většinou vede k poruchám nebo ke zničení transformátoru. Izolační olej v transformátoru plní současně dvě funkce:

- Funkce izolantu
- Funkce chladícího média [12]

2.2.2 Omezující faktory izolačního oleje

Hlavní faktory způsobující postupné snižování izolačního stavu oleje jsou:

- Voda
- Plyny rozpuštěné v oleji
- Mechanické částice

Vlhkost nepříznivě ovlivňuje jak elektrické, tak i mechanické vlastnosti stroje. Jedná se zejména o snižování elektrické pevnosti transformátoru, rozrušování povrchu izolantů a kovových částí uvnitř stroje. Vlivem navlhnutí izolačního oleje dochází ke změně rychlosti stárnutí oleje. Hlavní příčinou vzniku vlhkosti je voda, která vniká do transformátoru z okolní atmosféry. Zpočátku přijímá vlhkost v transformátoru pouze olejová náplň. Jakmile dojde k nasycení oleje vodou, začne přijímat veškerou vlhkost pevná izolace vinutí transformátoru. Nastane vyrovnání mezi obsahem vody v oleji a v pevné izolaci. Další vlhkost absorbuje jak olej, tak pevná izolace. Voda se může v transformátoru nacházet v několika formách.

Formy vody přítomné v transformátoru:

1) *Volná voda.*

Bývá usazená na dně nádoby transformátoru. Je nežádoucí. Přítomnost volné vody indikuje, že se v oleji nachází více forem vody. Neovlivňuje přímo elektrické vlastnosti transformátoru. Značně zhoršuje elektrické vlastnosti izolačního oleje v závislosti na teplotě oleje.

2) *Rozpuštěná voda*

Dostává se do oleje vlivem jeho hydrofobních vlastností. Například při styku oleje s atmosférou. Rozpuštěná voda zhoršuje elektrické vlastnosti izolačního oleje. Je značně nebezpečná.

3) *Emulgovaná voda*

Jedná se o směs mikroskopických kapek vody s izolačním olejem, vytváří olejovou emulzi. Vzniklá emulze má dvě formy:

- *Hydrofobní emulze.* Je směs oleje a kapek vody, kde se kapky vody volně vznášejí v oleji. Hydrofobní emulze vzniká, jestliže jsou v oleji přítomné

povrchově aktivní látky rozpustné v oleji, ale nerozpustné ve vodě. Například soli kovů, asfaltéry, atd.

- *Hydrofilní emulze.* Jedná se o směs vody a kapek oleje, kde kapky oleje volně plavou ve vodě. Hydrofilní emulze vzniká, pokud jsou ve vodě přítomné povrchově rozpustné látky avšak nerozpustné v oleji. Například sodná mýdla, atd.

Obě formy emulze jsou stálé a jejich odstranění je obtížné. Emulgovaná voda velmi zhoršuje elektrické vlastnosti oleje.

4) *Reakční voda*

Vzniká pouze vlivem chemických reakcí, oxidací oleje. Reakční voda vzniká na nejteplejším místě uvnitř transformátoru, například v místech kolem vinutí, v blízkosti jádra transformátoru. Odštěpná voda se při styku s chladnějšími částmi mění na vodu rozpuštěnou. Množství reakční vody indikuje stárnutí izolačního oleje.

Voda v izolačním oleji přechází v závislosti na teplotě, obsahu nečistot a obsahu kyselin z jednoho stavu do druhého. Množství vody, které se rozpustí v oleji není konstantní. Závisí na stupni rafinace, stupni okysličení nebo na teplotě. Rozpustnost vody je v izolačním oleji větší, čím je teplota oleje vyšší a naopak. [12]

2.3 Navlhnutí olejové náplně a celulózy

Postupné navlhnutí izolačního systému transformátoru probíhá při hermetizaci systému od okolní atmosféry a to stárnutím oleje a celulózy při kterém vzniká voda, plyny a další produkty stárnutí. Zvýšená teplota a produkty stárnutí se vzájemně posilují v celém systému olejového transformátoru. Produkty stárnutí a teplota systému mají vliv jak na izolační olej, tak na celulózu v transformátoru. Na izolační olej má největší vliv kyslík a vlhkost. Teplota pak působí jako urychlovač stárnutí izolačního oleje. U celulózy způsobuje stárnutí hlavně zvýšená teplota a vlhkost. Jako urychlovač zde působí kyslík.

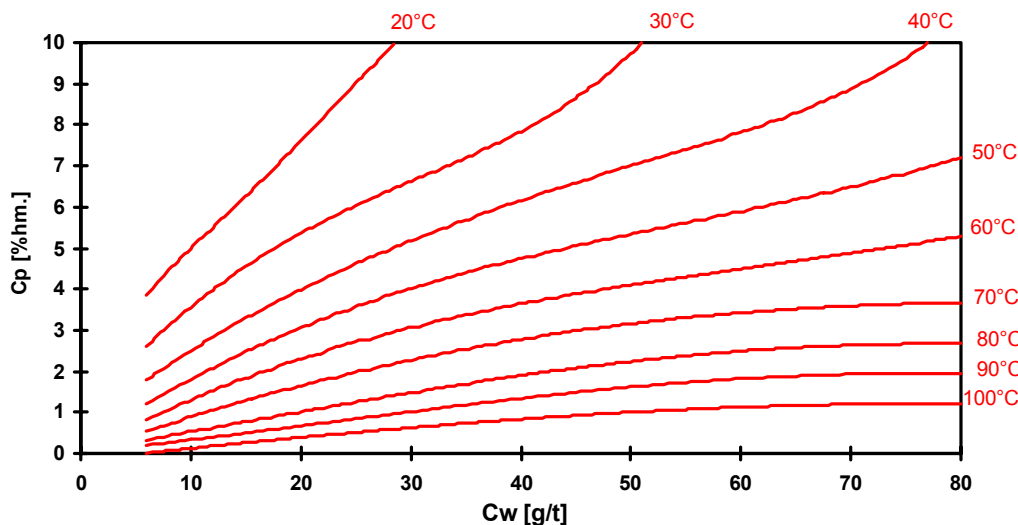
2.4 Stanovení obsahu vody v transformátorovém oleji

Nežádoucí navlhnutí izolační soustavy transformátoru je obvykle způsobeno infiltrací vzdušné vlhkosti a oxidačním stárnutím transformátorové celulózy i izolačního oleje. Všechna přítomná voda je vázaná v celulóze. Tento materiál dobře absorbuje vodu a je silně hydroskopický.

Současná diagnostika navlhnutí izolačního oleje je charakterizovaná zkouškou obsahu vody v odebraném vzorku izolačního oleje podle EN 60 814. Tato zkouška je do jisté míry nepřesná, protože velká část vody je deponovaná právě v celulózové izolaci transformátoru. Jako příklad mohu uvést skutečnost, že při zvýšení teploty transformátoru voda obsažená v pevné izolaci volně přechází do izolačního oleje a naopak. Naměřený obsah vody se tedy s teplotou výrazně mění. Proto mohu změřit za nízkých teplot izolačního oleje malou hodnotu obsahu vody v oleji C_w a po zahřátí transformátoru může obsah vody několikanásobně vzrůst. Posuzování stavu stroje pouze na základě obsahu vody v oleji do velké míry rizikové, protože může vést k ohrožení bezpečné funkce transformátoru. [1] Velmi dobrou vypovídající schopnost o navlhnutí transformátoru poskytuje hodnota obsahu vody v celulózových izolacích, protože zde nemá teplota podstatě vliv. Hodnotu vlhkosti můžu ovlivnit pouze vysušením celulózové izolace.

2.5 Provozní určení množství vody v transformátoru

Pokud nebudu brát v úvahu měření vlhkosti měřicí metodou, mohu stanovit množství vody v soustavě celulóza-olej pouze na základě Nielsenova diagramu, který je zobrazen v grafu 1. Pomocí diagramu provedu základní krok v odhadu skutečného navlhnutí stroje pomocí průměrného obsahu vody C_p obsažené v celulóze.



Graf 1. Nielsenův rovnovážný diagram obsahu vody v systému olej-celulóza [3]

Nielsenův diagram zobrazuje závislost obsahu vody v celulóze C_p a obsahu rozpuštěné vody v izolačním oleji C_w při známé teplotě. Přesnost odhadu množství vody v transformátoru je velmi těsně spojena s teplotou izolačního oleje ve stroji. Pro názorný příklad mohu uvést případ, kdy transformátor nemá nucený oběh izolačního oleje a znám celkovou hmotnost celulózy v transformátoru. Izolační olej má v horních vrstvách transformátoru vyšší teplotu. Pokud změřím teplotu oleje v horní části nádoby transformátoru, kde je olej teplejší, na základě Nielsenova diagramu určím příliš nízkou hodnotu C_p obsahu vody deponovanou v celulóze. Dopouštím se tedy závažné chyby a tím i podcením navlhnutí celulózy. Ovšem pro první informativní pohled mohu provést několik měření teploty v horní části a stejný počet měření ve spodní části nádoby. Na základě aritmetického průměru ze získaných hodnot určím teplotu, kterou po odečtení z diagramu, získám přibližné množství vody v izolačním systému. Pokud neznám množství celulózy v transformátoru, můžu množství hmoty relativně přesně určit v sušeném stroji z množství vody z vysoušeče transformátoru při provozním sušení stroje.

Tab. 1. Vliv vlhkosti izolačního systému [3]

C_p	Stav transformátoru
< 0,8	Nový, dobře vysušený
~ 2,0	Dobrý provozní stav
> 3,3	Počátek stárnutí
~ 4,5	Průraz pravděpodobný při 90°C
~ 7,0	Průraz pravděpodobný při 50°C
> 8,0	Okamžitě odstavit a sušit

V tab. 1 uvádím přibližný odhad vlivu vlhkosti izolačního systému. V případě nevyhovujících izolačních vlastností provedu například vysušení transformátoru a tím snížím obsah vody v izolačním systému. [1]

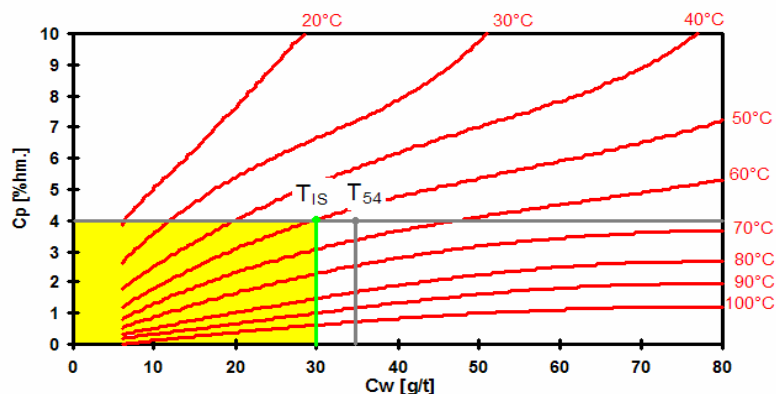
2.6 Využití Nielsenova rovnovážného diagramu

Výhodou Nielsenova rovnovážného diagramu olej-celulóza je jeho rychlé použití. Nielsenův diagram se může využít v níže popsanych případech. [16]

2.6.1 Odhad nejvyšší možné provozně přípustné teploty transformátoru

Je to nejvyšší možná teplota, při které mohu bezpečně provozovat transformátor. Zároveň nevzniká nebezpečné snížení izolačního stavu transformátoru vlivem množství rozpuštěné vody v izolačním oleji C_w .

Příklad 1.: Teplota izolačního oleje v modelovém transformátoru je 54 °C. Naměřil jsem obsah vody v oleji C_w 40 g/t a určil obsah vody v celulóze 4 %.



Graf 2. Odhad nejvyšší přípustné teploty transformátoru

Je-li pro modelový transformátor stanovené maximální přípustné množství vody v oleji například 30 g/t, je v grafu 2 na základě vodorovné přímky C_p , která stanoví množství obsahu vody v pevné izolaci vymezená oblast teplot, v které lze transformátor bezpečně provozovat. Průsečíky izoterm s vodorovnou čarou C_p vymezují teplotu, kterou nesmím překročit, aby nenastal nebezpečný elektrický stav stroje. Bezpečnou oblast znázorňuje v grafu 2 žlutý obdélník. V modelovém případě je obsah vody v oleji C_w 40 g/t při 54 °C a nachází se podle grafu 2 mimo přípustnou oblast.

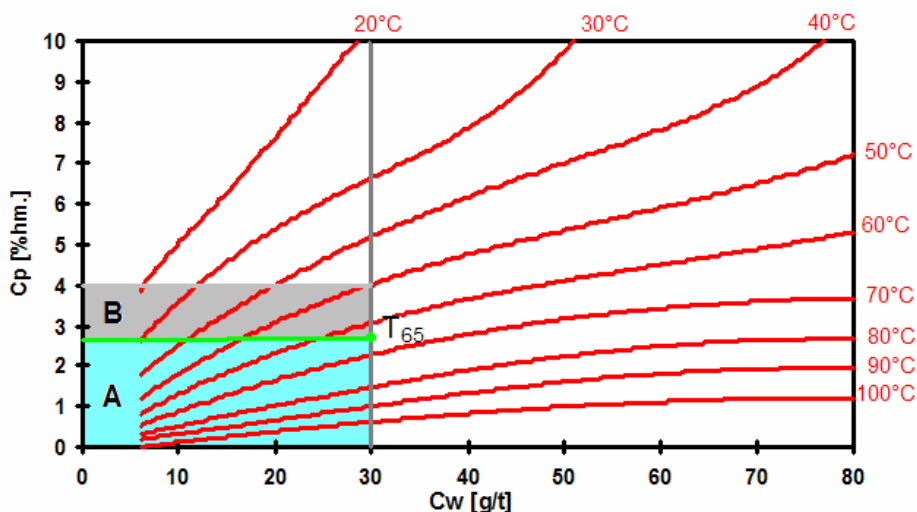
Transformátor vykazuje střední stupeň navlhnutí. Z příkladu 1 je patrné, pokud nesmím překročit dovolenou mez navlhnutí oleje 30 g/t musím snížit teplotu T_{65} transformátoru na teplotu T_{1S} . Teplota nesmí překročit hodnotu 50 °C. Pokud by teplota T_{1S} byla vyšší, transformátor se bude nacházet v nebezpečné oblasti. V případě pokud vlivem provozu transformátoru budu muset překročit teplotu 50 °C je potřeba zjistit, jakého stupně vysušení je potřeba, respektive jak musí klesnout hodnota C_p aby bylo možné transformátor bezpečně provozovat. V letním období je nutné počítat, že při stejných provozních podmínkách může teplota vzrůst k 65 °C. [16]

2.6.2 Odhad požadovaného stupně koncového vysušení transformátoru

V tomto případě na základě Nielsenova diagramu určím kolik vody je potřeba odstranit z transformátoru, abych mohl stroj bezpečně provozovat.

Příklad 2.: Předpokládám že pracuji opět s modelovým transformátorem a podmínkami z příkladu 1. Hmotnost pevné izolace v transformátoru je 800 kg.

Pro maximální přípustný obsah vody v oleji v mém případě je mez $C_w = 30$ g/t. Provozní teplota stroje je maximálně včetně letního období 65°C . Kolmá přímka vztyčená z hodnoty $C_w = 30$ g/t na ose X protíná izotermu zhruba na hodnotě $C_p = 2,8\%$ hmotnosti a udává tím oblast vysušení. V grafu 3 je oblast B, kterou je potřeba odstranit vysušením znázorněna šedou barvou. Objem vody, který musím vysušit vypočítám následovně.



Graf 3. Odhad požadovaného stupně vysušení transformátoru

Výpočet množství vody, které je nutné odstranit z transformátoru se vypočítá podle vztahu 1.

$$V = (C_{pskut} - C_{ppož}) * m = (0,04 - 0,028) * 800 = \underline{\underline{9,6l}} \quad (1)$$

Abych dodržel zadaný maximální obsah vody v oleji $C_w = 30$ g/t a mohl bezpečně provozovat transformátor maximálně na teplotě 65°C , musím z transformátoru vysušit 9,6 litrů vody. [16]

2.7 Jakostní parametry oleje

Pro správné zabezpečení chladicí funkce, musí olej splňovat určité podmínky. Na stárnutí oleje má vliv specifická skupina faktorů.

Faktory mající vliv na stárnutí transformátorového oleje:

- Teplota
- Elektrické pole
- Zvýšený obsah vody a kyslíku
- Katalytické působení kovů

Stárnutí transformátorového oleje způsobuje:

- Polymerizaci
- Vznik kyselin
- Vznik kalů

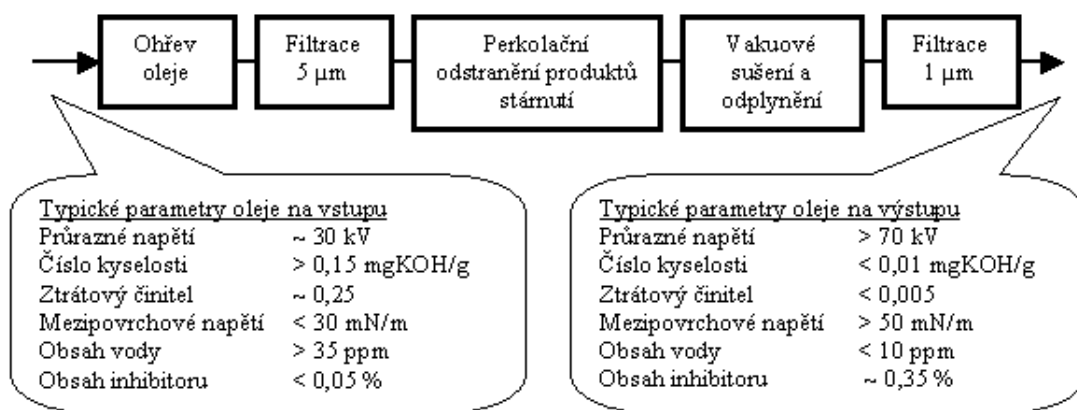
Při polymerizaci transformátorového oleje dochází ke zvětšování molekul a tím i snižování proudění oleje. V transformátoru může vlivem polymerizace docházet k zvyšování teploty oleje až na úroveň tepelného průrazu stroje. Některé částice se vlivem polymerizace mohou stát nerozpustnými. Nerozpustné částice se vylučují formou kalu. Kaly, které vznikají spolu s teplotou nevratně narušují celulózovou izolaci uvnitř transformátoru. Oxidací oleje s kyslíkem vznikají v oleji kyseliny, které působí s vodou rovněž na celulózovou izolaci i kovové části transformátoru. Velkost oxidačních změn v oleji závisí převážně na chemickém složení kapalného izolantu, obsahu urychlujících látek a teplotě, která je důležitá při oxidační reakci. Všechny tyto chemické reakce jsou urychlovány přítomností kovovými katalyzátory. Mezi nejúčinnější mohu zmínit měď, železo, mangan, kobalt. Tedy kovy, které jsou použity jako konstrukční složky transformátoru. Pro zpomalení oxidačních procesů v oleji se používají látky s inhibičními účinky. Mezi látky s inhibičními účinky mohu zařadit například antioxydanty. Problém zestárlého oleje se může řešit dvěma způsoby:

- Výměnou oleje
- Regenerací oleje

Protože životnost transformátoru musí být co nejdelší, je nezbytné provádět periodické sledování jakosti transformátorového oleje. Na základě kontroly izolačního oleje, určím dobu, kdy musím olej regenerovat nebo zcela vyměnit. Vlivem kontroly olejové náplně stroje snižuji riziko umělého zkracování životnosti transformátoru a předcházím zničení stroje vlivem elektrického průrazu. [12]

2.7.1 Regenerace transformátorového oleje

Regenerací oleje dochází k prodloužení životnosti kapalného izolantu a obnovení původních vlastností izolačního oleje. Regeneraci oleje provádím pomocí regeneračního zařízení pro transformátorové oleje. Blokové schéma regeneračního zařízení s informativními parametry na vstupu a výstupu zobrazuje obr. 2.



Obr. 2. Blokové schéma regeneračního zařízení [17]

Znečištěný olej se přivádí na vstup do ohříváče. V ohříváči je olej zahřátý na teplotu 75 °C. Ve filtru jsou zachycovány částice větší než 5 µm. Částice > 5 µm jsou produkty vzniklé provozním opotřebením, tepelným a chemickým rozkladem pevných izolací nebo kovů. Olej následně proudí do perkolaátorů, kde se fyzikálně chemickou cestou odstraní produkty stárnutí (polymery, mýdla, kyseliny). Pro dosažení účinného efektu, musí olej setrvat v koloně 30 až 40 minut. Z perkolaátorů olej přichází do vakuové komory, kde se odplyňuje a suší. Na výstupu ještě olej prochází filtrem 1 µm pro dosažení vyšší čistoty. Při regeneraci vlastností transformátorového oleje dochází k míchání znečištěného oleje s olejem regenerovaným. Celá olejová náplň transformátoru musí několikrát protéci regeneračním zařízením, aby byla dodržena požadovaná kvalita kapalného izolantu. Výstupní parametry oleje po regeneraci jsou srovnatelné s parametry nového oleje. [12]



Obr. 3. Ukázka olejů během procesu regenerace [17]

Na obr.3 je patrné jakým způsobem se mění vzhled izolačního oleje v průběhu procesu regenerace. Olej nejtmavší je olej znečištěný. Nejsvětlejší barvu má olej přečištěný.

2.7.2 Vakuový separátor

Zařízení s nepřetržitým odlučováním vody a plynů v izolačním oleji se podle principu činnosti nazývá vakuový separátor. Vakuový separátor se používá za provozu transformátoru pro kontinuální úpravu fyzikálních a chemických vlastností izolačního oleje, aby se v průběhu provozu stroje předcházelo nebezpečnému znečištění izolačního oleje kontaminanty. Nejčastějším způsobem nepřetržitého čištění je princip vakuové separace kapalných a plynných kontaminantů. Separace se provádí externím zařízením, do kterého se přivádí znečištěný olej z transformátorového okruhu. Po vyčištění se izolační olej zpět vtlačuje do původního olejového okruhu transformátoru. Děj se periodicky opakuje a tím se udržuje požadovaná kvalita kapalného izolantu.

3 Vliv izolačního oleje na povrchové vlastnosti transformátoru

Transformátorové oleje za svého provozu ztrácejí své původní hodnoty. Změny vlastností izolačního oleje vznikají vlivem kombinovaného působení externích vlivů prostředí. Například změnou teploty, působení vlhkosti a vody, elektrického pole, pevných částic, kovových katalyzátorů přítomných v transformátoru. Vlivem těchto změn dochází ke vzniku organických kyselin, aldehydů, ketonů, mýdel a k polymerizaci nenasycených uhlovodíků - dochází ke „stárnutí“ izolačního oleje. Přítomností vzniklých organických kyselin dochází k oxidaci kovů přítomných v olejové lázni a masivnímu rozkladu celulózové izolace transformátoru. Pokud vlivem stárnutí olejové náplně dochází k dlouhodobému překračování sledovaných parametrů transformátoru, dochází k nevratnému porušení jednak celulózové izolace, ale probíhá i intenzivní koroze kovových částí uvnitř polohermeticky uzavřeného transformátoru. Transformátor uměle stárne, zvyšuje se riziko elektrické havárie stroje. Oxidaci povrchu kovových částí a izolantů uvnitř transformátoru nelze z důvodu nepřístupnosti a polohermetické konstrukce stroje sledovat přímou metodou. Jediný možný způsob jakým lze posoudit oxidaci pevných izolantů a kovů v transformátoru je pomocí nepřímých metod. [12]

3.1 Celulóza

Používá se pro izolaci vinutí transformátoru. Je tvořena ze sulfátové buničiny. Celulóza nesmí obsahovat látky, které by ovlivňovaly kvalitu transformátorového oleje. Počet vodivých částic v celulóze musí být co nejmenší, protože při provozu transformátoru je celulóza tepelně namáhána. Důležitým ukazatelem celulózy je její tepelná stálost. [13]

3.1.1 Degradace celulózové izolace

Izolační systém výkonových transformátorů je tvořený kombinací izolačního oleje a celulózové izolace. Tyto materiály mohou v provozu degradovat a přestat plnit funkci, pro kterou byly navrženy. Mohou být příčinou elektrického výpadku transformátoru. Poškození celulózové izolace je závislé na teplotě, čase, množství vlhkosti a kyslíku. Analýza celulózy není složitá, ale získání vzorků celulózy

z vnitřku olejových transformátorů je velmi obtížné. Zavádí se zde nepřímá metoda měření. Běžně se uvažovalo, že velké množství oxidu uhlíku v transformátorovém oleji indikuje pouze degradaci celulózy. Avšak tyto oxidy mohou vznikat také degradací izolačního oleje. Proto mohou být naměřené výsledky v některých případech zavádějící. Během 70. let byla v izolačním oleji zjištěna přítomnost 2-furfuraldehydu a příbuzných sloučenin. "Degradace celulózových materiálů, které jsou součástí pevných izolantů v elektrických zařízeních plněných olejem, vede k tvorbě sloučenin typických pro rozklad celulózy, jako jsou cukry a furanové deriváty. Furanové deriváty, z nichž převážná část zůstává adsorbovaná na papíře, jsou však částečně rozpustné v oleji. Jejich přítomnost tak může být využita k diagnostice provozu zařízení a jako doplňující informace k analýze." [12]

3.2 Měď

Měděné vinutí cívek transformátorů tvoří jednu z hlavních částí transformátoru. Měď je vhodný konstrukční materiál pro svou dobrou korozivní odolnost v některých prostředích snadnou zpracovatelnost, dobrou tepelnou a elektrickou vodivost. V atmosférických podmínkách je měď velmi stálá. Ochranná vrstva je složena obvykle ze síranů, uhličitanů chloridů a siřníků. Ve vodě je měď také velmi stálá. V kyselých prostředích, zejména oxidačních je velmi napadána. V kyselinách v případě, že není přítomný rozpuštěný kyslík má dobrou odolnost. [12]

3.2.1 Koroze kovových částí povrchu uvnitř transformátoru

Jestliže v případě rozkladu celulózy v uzavřeném systému můžeme spoléhat určitým způsobem na metodu přítomnosti 2-furfuraldehydu a jeho příbuzných sloučenin, u korozního povrchu kovových částí v uzavřených systémech transformátoru tomu tak není. Velmi hrubý pohled mohou získat rozbořem plynů rozpuštěných v oleji transformátoru nebo laboratorní modelovou zkouškou. Modelová laboratorní zkouška spočívá v simulaci korozivního prostředí například olej-měď a poté prozkoumání povrchu vodiče elektronovým mikroskopem. Měděné vodiče tvoří důležitou část vinutí transformátoru. Popsanou modelovou zkoušku jsem prováděl ve své bakalářské práci. [12]

4 MECHANISMUS TVOŘENÍ PLYNŮ V IZOLAČNÍM OLEJI

Plyny, které jsou rozpuštěné v izolačním oleji pocházejí díky netěsnostem nádoby z větší části okolního ovzduší. Jsou to například: Oxid uhličitý, dusík, vzdušné plyny - kyslík. Přírodním stárnutím oleje, pevných izolací a následkem elektrického i tepelného namáhání dochází ke vzniku rozkladových plynů vytvořených z oleje a pevných izolací. Jsou to: oxidy uhlíku, vodík, metan, ethan, etylén a některé nasycené i nenasycené uhlovodíky. Tyto plyny se mohou v oleji rozpouštět, až do jejich úplného nasycení. Množství a stav koncentrace plynů, případně průběh vývoje tvoření plynů v izolačním oleji podává obraz o stavu a do určité míry i závadě na elektrickém stroji. Plyny také vznikají z důvodů koroze oceli nebo jiných chemických reakcí ocelí na nechráněných místech povrchů nebo ochranných nátěrech nádoby. Vodík se může vytvořit například:

- Reakcí oceli s vodou pokud je přítomný kyslík v oleji.
- Reakcí volné vody se speciálními povlaky na kovových površích
- Reakcích některých typů nerezových ocelí s olejem, který obsahuje kyslík při zvýšené teplotě. [12]

4.1 Stanovení obsahu rozkladových plynů rozpuštěných v izolačním oleji

Analýzou plynů ve vzorcích izolačních olejů odebíraných z transformátoru, lze při pravidelných kontrolách včas odhalit závadu, sledovat její časový vývoj a provést identifikaci poruchy.

4.1.1 Metoda plynové chromatografie

Metoda spočívá v analýze oleje na přítomnost rozpuštěných rozkladových plynů. Tak jak transformátor prochází velkým tepelným a elektrickým namáháním, soustřeďuje se uvnitř stroje nějaké množství rozkladových plynů. Jak olej, tak i celulózové izolační materiály se rozkládají. Výsledek těchto namáhání je tvorba plynů. Rychlost a množství soustředěného plynu je důležité, protože při normálním

stárnutí izolačního oleje se tvoří také plyny, ale velmi pomalu. Počáteční nebo nově vytvořené podmínky závady mění toto hledisko. Je důležité, že převládající většina těchto počátečních poruch se projeví v ranném stadiu a tím je možné plyny detekovat v době, kdy transformátor prochází kontrolou. Plynová chromatografie je nejpoužívanější dostupná metoda k identifikování rozkladových plynů. Plynová chromatografie zahrnuje, kvalitativní i kvantitativní analýzy plynů rozpuštěných v transformátorovém oleji. Postupy zahrnují extrakci a měření plynů, které jsou rozpuštěné v oleji, včetně identifikace a měření jednotlivých složek. Minerální oleje se skládají přibližně z 2 800 vytvořených tekutých složek. Pouze devět plynů se běžně nachází v izolačním oleji. Tyto plyny jsou ukázány v tab. 2. I když ostatní plyny jsou zjištěitelné a identifikovatelné, jejich přítomnost v oleji nemá u transformátoru podstatný význam. [12]

Tab. 2. Typické plyny nashromážděné vlivem poruch transformátoru [18]

Název plynu	Rozkladový plyn	Chemické označení
Acetylén	Ano	C_2H_2
Etan	Ano	C_2H_6
Etylen	Ano	C_2H_4
Metan	Ano	CH_4
Oxid uhelnatý	Ano	CO
Vodík	Ano	H_2
Dusík	Ne	N_2
Kyslík	Ne	O_2
Oxid uhličitý	Ne	CO_2

4.1.2 Demontrace rozkladových plynů v transformátorovém oleji

Pokud podrobím vzorek transformátorového oleje a celulózové izolace stroje modelové experimentální zkoušce v laboratoři, provede se měření, které bude zatěžovat jednotlivé díly podle provozních podmínek zjištěných u transformátoru. Mohu zjistit některý z následujících údajů. [18] [12]

1. Celulóza

a) Přehřátí celulózy

Jestliže je celulóza přehřátá v uzavřeném systému transformátoru a nashromážděny plyny, zkoušky ukazují, že základní produkty rozložení při teplotě nižší než 140 °C jsou:

- CO
- CO₂
- H₂O

b) Pyrolýza celulózy

Jestliže je celulózová izolace zahřívána až k jejímu porušení (pyrolýza), při teplotách nad 250 °C v uzavřeném nebo utěsněném zařízení se může tvořit pravděpodobně 4x více CO než CO₂ co do objemu.

2. Transformátorový olej

a) Přehřátí oleje

Jestliže je minerální izolační olej přehřátý při teplotách až do 500 °C, uvolní se následující uhlovodíkové výpary:

- Etylén
- Etan
- Metan

Další produkty uvolněné pod 500 °C s určitým obsahem kyslíku jsou:

- Oxid uhličitý (400 °C)
- Voda (200 °C)

b) Pyrolýza oleje

Když je olej vystavený extrémním elektrickým zatížením, uvolní se následující množství plynů:

- Vodík 60-80 %
- Acetylén 10-25 %
- Metan 1,5-3,5 %
- Etylén 1-2,9 % [18]

5 VLIV IZOLAČNÍHO OLEJE NA FUNKCI TRANSFORMÁTORU

Pro bezporuchovou funkci transformátoru je důležitá periodická kontrola vybraných vlastností izolačního oleje, které mají bezprostřední vliv na funkci transformátoru. Změna vlastností kapalného izolantu ovlivňuje například výpadky zařízení, elektrickou bezpečnost transformátoru, předčasné stárnutí nebo úplné zničení transformátoru. Vlivem analýzy vlastností izolačního oleje se včas odhalí závady, které mohou způsobit poruchy provozu transformátoru. [12]

Sledované vlastnosti izolačního oleje

- Elektrická pevnost oleje
- Obsah vody rozpuštěné v oleji
- Kyselost oleje
- Ztrátový činitel
- Relativní permitivita
- Vnitřní rezistivita
- Stanovení mezipovrchového napětí na rozhraní olej-voda
- Hustota oleje
- Plynová chromatografie

5.1 Elektrická pevnost izolačního oleje

Všechny izolační materiály, které se nacházejí v elektrickém poli, ztrácí své izolační schopnosti, pokud na ně působí zvyšující se elektrické napětí. V určitou dobu pokud napětí přesáhne kritickou hranici, vznikne vodivý elektrický přeskok napětí a z izolantu se stává elektrický vodič. Hodnota napětí, při kterém vznikne porušení izolačních vlastností oleje nazýváme průrazné napětí. Velikost průrazného napětí je nejčastěji posuzovanou vlastností izolačního oleje. Na velikost průrazného napětí má vliv mnoho faktorů, například: teplota, vlhkost, čas, působení napětí apod. Jednotkou pevnosti je kV/2,5mm. [13]

5.2 Obsah vody rozpuštěné v oleji

Přítomnost rozpuštěné vody v oleji má zhoršující vliv na dielektrické vlastnosti izolačního oleje. Zhoršené dielektrické vlastnosti se projevují na snížení elektrické pevnosti oleje. Pokud při odběru vzorku oleje znám teplotu, je možné orientačně určit na základě Nielsenova diagramu stupeň navlhnutí celulózové izolace transformátoru. Voda vniká do oleje vlivem jeho hydrofobických vlastností. Voda vniká do oleje například z ovzduší, netěsnostmi transformátorové naboby, průchodkami, ventily apod. Voda v izolačním oleji rovněž vzniká jako produkt oxidačního stárnutí při polykondenzačních reakcích. Měřením nelze stanovit, kolik je vody v transformátoru. Zjistí se, zda je přítomná voda rozpuštěná nebo emulgovaná. Dostupnými metodami není možné z izolačního oleje zjistit vodu volnou. Jednotkou obsahu vody rozpuštěné v oleji je miligram vody na kilogram oleje (mg/kg). [12]

5.3 Kyselost oleje

U nového izolačního oleje udává kyselost oleje stupeň rafinace oleje, případně množství kyselin zbylých po rafinaci. Kyseliny v oleji vznikají oxidačními pochody. Kyseliny přítomné v oleji mají degradační účinky na izolanty a způsobují korozi kovových částí transformátorů. Výsledným působením kyselin v oleji jsou kaly a usazeniny. [12] Dle ČSN EN 62021-1 je číslo kyselosti (acidity) množství alkálie vyjádřené v miligramech hydroxidu draselného na gram vzorku, potřebné k potenciometrické titraci zkoušeného podílu v daném rozpouštědle k dosažení pH 11,5. [11] Měrnou jednotkou je 1 miligram hydroxidu draselného na 1 gram vzorku izolačního oleje (mg KOH/g).

5.4 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel je celkový ukazatel přítomnosti polárních a iontových složek v izolačním oleji. Je to jeden z ukazatelů stárnutí izolačního oleje. Význam ztrátového činitele je v tom, že podává informaci o možném ohřevu dielektrika vlivem průchodu elektrického proudu vinutím transformátoru a tím i možnému tepelnému průrazu stroje. Ztrátový činitel je bezrozměrné číslo. Značí se $\tan\delta$. Ztrátový činitel se měří pouze při laboratorní teplotě. [12]

5.5 Relativní permitivita

Relativní permitivita je poměr kapacity kondenzátoru se zkoušeným izolačním olejem ke kapacitě vzduchového kondenzátoru. Relativní permitivita má vliv na rozložení elektrického pole. Je úměrná stavu dielektrika. Indikuje fyzikálně chemické změny z hlediska polarizace molekul. Relativní permitivita s teplotou klesá, se stárnutím oleje její hodnota roste. Relativní permitivita se značí ϵ . Je to bezrozměrné číslo. Relativní permitivita se měří pouze při laboratorní teplotě. [12]

5.6 Vnitřní rezistivita

Vnitřní rezistivita je závislá na vlhkosti a stupni oxidace izolačního oleje. Umožňuje jen zjištění přítomnosti produktů provozního stárnutí a přítomnost absorbované vody. S rostoucí teplotou izolačního oleje transformátoru se hodnota rezistivity zmenšuje. Hodnota vnitřní rezistivity se měří pouze laboratorně a udává se v $G\Omega m$. [12]

5.7 Stanovení mezipovrchového napětí na rozhraní olej-voda

Hodnota mezipovrchového napětí citlivě indikuje počátek stárnutí izolačního oleje, kdy jako produkty stárnutí vznikají v oleji rozpustné organické látky. [12]

5.8 Hustota oleje

Hustota izolačního oleje je důležitá veličina pro výpočet povrchového napětí izolačního oleje. [12]

5.9 Plynová chromatografie

Na základě rozboru plynů přítomných v oleji se stanovuje například stupeň tepelného namáhání stroje, vznik elektrických výbojů, přehřátí apod. Metoda plynové chromatografie je jedinou možnou metodou, kterou mohou být použity k indikaci tepelného stárnutí izolačního oleje nebo soustavy olej-celulóza. Na základě množství a složení uvolněných plynů v izolačním oleji se určí druh závady v systému. Při hodnocení chromatografie je potřeba přihlížet s ohledem na historii předchozích naměřených

hodnot. Výsledkem hodnocení je časový vývoj jednotlivých obsahů plynů v izolačním oleji. [12]

6 NÁVRH METODIKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

- Odběry vzorků
- Stanovení vody v oleji přístrojem Coulometr 831
- Měření izolačního oleje zkoušečkou průrazného napětí BAUR DTA 100 E
- Určení čísla kyselosti izolačního oleje potenciometrickou metodou měřícím přístrojem 702 SM TITRINO
- Stanovení ztrátového činitele izolačního oleje, relativní permitivity, vnitřní rezistivity Scheringovým můstkem typ 2821 a Ohmetrem TETTEX typ 5476
- Stanovení hustoty izolačního oleje hustoměrem
- Stanovení relativního mezipovrchového napětí olej-voda
- Stanovení množství inhibitoru v izolačním oleji
- Stanovení celkového obsahu plynů v oleji metodou adsorpční plynovou chromatografií

7 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY A JEJICH VYHODNOCENÍ

Předmětem experimentálních zkoušek bylo porovnání a vyhodnocení třech vzorků izolačního oleje ze stejného vysokonapětového transformátoru v různých časových obdobích. Vysokonapětový transformátor byl mimo provoz v období od 16.4.2008 do 18.10.2008. Měření izolačního oleje bylo provedeno laboratořemi:

- ORGREZ, a.s., Praha Karlín E01
- ČEZ, a.s., zkušebna olejů Kamýk nad Vltavou E54

7.1 Vzorky izolačního oleje

Pro experimentální měření izolačních olejů jsem použil tři vzorky izolačního oleje ze stejného stroje. Vysokonapětový transformátor měl v období od 16.3.2008 do 18.10.2008 vypnutý vakuový separátor.

Popis vzorků:

Vzorek č.1: Izolační olej odebraný dne: 11.3.2008. Transformátor byl provozovaný v nepřetržitém provozu do 15.5.2008. Vakuový separátor byl zapnutý.

Vzorek č.2: Izolační olej odebraný dne: 20.10.2008. Transformátor byl v období odstávky od 15.5.2008 do 25.9.2008 vypnutý. Vakuový separátor byl vypnutý do 18.10.2008.

Vzorek č.3: Izolační olej odebraný dne: 10.3.2009. Transformátor je od 25.9.2008 provozovaný v nepřetržitém provozu dosud.

Experimentální měření plynovou chromatografií bylo provedeno v olejové laboratoři ORGREZ, a.s., Praha Karlín, zkušební laboratoř E01, ostatní zkoušky byly provedeny v ČEZ, a.s., Vodní elektrárny, zkušebna olejů E54 Kamýk nad Vltavou.

7.2 Odběr vzorku izolačního oleje

Metodice odběru a dopravě vzorků izolačního oleje do laboratoře je důležité věnovat náležitou pozornost. Při nedodržování zásad dochází k ovlivnění vzorků vnějším prostředím a to má za následek zkreslení naměřených hodnot.

Vzorky izolačních olejů se v závislosti na potřebném objemu oleje odebírají pokud možno bez přístupu vzduchu těmito způsoby:

- Injekční stříkačkou
- Pomocí vzorkovací trubice
- Do láhve

Odběrové nádoby je nutno mít pečlivě očištěné a vysušené. Při odběru vzorku musím dbát, aby po naplnění nádoby olejem nebyly přítomné bubliny vzduchu. Vzorky ihned po odběru označím a uložím do vzorkovnice pro další přepravu do olejové laboratoře. Vzorky nesmím vystavovat slunečnímu záření, působení okolní atmosféry a prudkým změnám teploty. Vzorky musím dopravit do laboratoře nejpozději do třech dnů po jejich odběru. [9] [12]

7.3 Stanovení vody v oleji přístrojem Coulometr 831

Podstata zkoušky

Coulometr 831 pracuje na Karl-Fischerově titračním principu a coulometrickým způsobem vyhodnocuje vylučování jódu. Přístroj je vybavený mikroprocesorem a pracuje automaticky. Při Karl-Fischerově reakci není jód přidáván, ale vylučován chemickou reakcí. [7]

Potřebné zařízení a chemikálie

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Coulometr 831 KF
- Injekční stříkačka
- Činidla pro analýzu Hydranal - coulomat AG a Hydranal - coulomat CG
- Činidla k čištění elektrody - hexan, ethanol

Příprava měření

Měřicí části baněk musí být dokonale vyčištěné a vysušené. Do sestavené měřicí cely vložím dmýchadlo a otvorem ve víku naplním anodový prostor příslušným roztokem. Katodový prostor naplním 4 ml roztokem coulomat CG a elektrody připojím k přístroji.

Postup měření

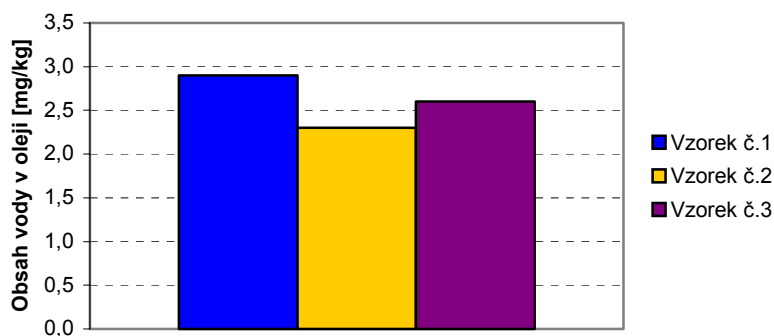
- Příprava vzorků - Vzorky nesmí být vystavovány přímému slunečnímu záření a musí být uschovány v temnu. Stříkačky pro měření musí být suché.
- Příprava přístroje - Přístroj se sestaví podle návodu k obsluze. Na míchadle se nastaví rychlost míchání.
- Vlastní měření - Spustí se míchadlo, zapne se Coulometr a postupuje se dále podle návodu k použití. [3]

Vyhodnocení

Po ukončení měření se naměřená hodnota zobrazí na displeji přístroje. [4] [10] [12] Naměřené hodnoty jsou uvedené v tab. 3.

Tab. 3. Obsah vody v oleji

Číslo vzorku	Q_v [mg/kg]
Vzorek č.1	2,9
Vzorek č.2	2,3
Vzorek č.3	2,6



Graf 4. Obsah vody v oleji

Z elektrického hlediska pro sledovaný transformátor o napětíové hladině 400 kV a výkonu 360 MVA, maximální přípustná hodnota vody v oleji 25 mg/kg. Z toho můžu usuzovat, že naměřené výsledky jsou více než uspokojivé. Rozdíly v jednotlivých měřeních jsou zanedbatelné a jsou způsobeny chybou měření, které jsou v toleranci. Dále můžu konstatovat, že chod nebo klid vakuového separátoru nemá vliv na obsah vody v oleji a je tudíž pro toto měření nepodstatný. Z mechanického hlediska je naměřené množství vody, které působí korozivně na povrchy uvnitř transformátoru zanedbatelné. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafu 4.

7.4 Stanovení průrazného napětí

Podstata zkoušky

Podstatou zkoušky je plynulé zvyšování napětí mezi elektrodami, které jsou ponořeny ve zkoušeném izolačním oleji až do doby, kdy vznikne přeskok mezi elektrodami. Napětí při kterém vzniknul přeskok je průrazné napětí a přístroj hodnotu zaznamená. [12]

Potřebné zařízení

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Zkoušečka olejů typ BAUR DTA 100E

Zkoušečka je plně automatický přístroj pro provádění zkoušek průrazného napětí kapalných i pevných izolantů podle zabudovaných programů v přístroji.

Postup měření

- a) Příprava zkušební nádoby - Nádobu musí být vysušená. Zkontroluji měrkou vzdálenost elektrod.
- b) Příprava vzorků na zkoušku - Před naplněním nádoby vypláchnu měřicí prostor měřeným izolačním olejem, aby okolní stěny nádoby byly pokryté souvislou vrstvou oleje. Po vypláchnutí naliji vzorek oleje tak, aby nevznikaly zbytečně bubliny v oleji.
- c) Vlastní měření - Zapnu přístroj. Zvolím na klávesnici požadovanou zkušební normu. Nasadím do přístroje nádobku s olejem a spustím měření.

Vyhodnocení

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4. Naměřené hodnoty průrazného napětí měřicím přístrojem BAUR DTA 100E

Číslo vzorku	kV/2.5 mm					
Vzorek č.1	96,0	93,7	86,6	80,7	85,2	90,3
Vzorek č.2	83,5	82,3	93,5	90,4	90,2	92,1
Vzorek č.3	90,4	77,0	83,9	85,3	82,0	92,3

Z naměřených hodnot se vypočítá aritmetický průměr U_p v kV, směrodatná odchylka s v kV a variační koeficient V_a v % vypočítá podle vztahů 2 až 4.

$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^n U_{pi}}{n} \quad (2)$$

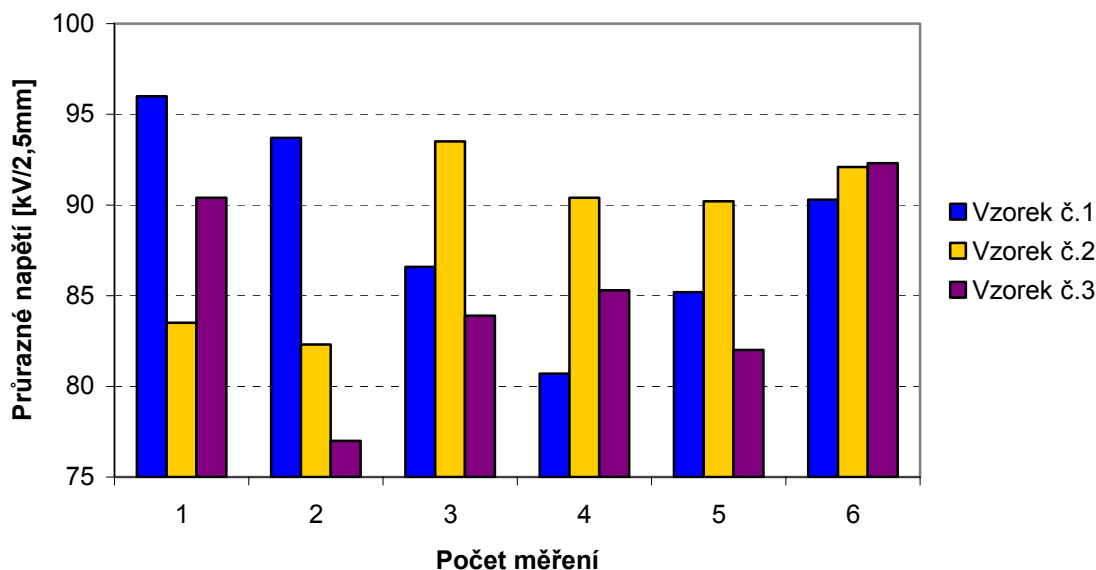
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{U}_p - U_{pi})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$V_a = \frac{s}{U_p} * 100\% \quad (4)$$

Pokud je hodnota variačního koeficientu vyšší než 20 %, musí se provést doplňující měření (max. $n = 20$). Pokud i nadále variační koeficient převyšuje 20 % považuje se vzorek za nevyhovující. [6] [3] [12] Výsledky zkoušky jsou zpracované v tab. 5.

Tab. 5. Výsledky zkoušky

Číslo vzorku	U_p [kV/2.5mm]	s [kV/2.5mm]	V [%]
Vzorek č.1	88,8	5,7	6,4
Vzorek č.2	88,7	4,6	5,2
Vzorek č.3	85,2	5,6	6,6



Graf 5. Graf hodnot průrazného napětí

Doporučené hodnoty průrazného napětí izolačního oleje transformátoru musí být větší jak 65 kV/2.5mm. Data získané měřením ukazují na dobrý stav izolačního oleje z hlediska elektrické pevnosti. V tomto případě vypnutí vakuového separátoru (cca 7 měsíců) nemá podstatný vliv na kvalitu oleje. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafu 5.

7.5 Určení čísla kyselosti izolačního oleje

Podstata zkoušky

Zkouška probíhá v mikroprocesorově řízeném přístroji automaticky. Měření vyjadřuje množství acidity v miligramech hydroxidu draselného na miligram vzorku potřebné k potenciometrické titraci testovaného podílu v rozpouštědle k dosažení pH 11,5. [12]

Potřebné zařízení

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Potenciometrický titrátor 702 SM TITRINO
- Byreta, míchadlo, titrační nádobka, titrační stojan
- Referenční elektroda SOLOVOTRODE-LL kobinovaná PH elektroda
- Hydrogenftalát draselný, 2-propanol

- Vodné tlumivé roztoky pufrů (pH 4, pH 7, pH 10)
- Kyselina chlorovodíková

Postup měření

- Zapne se titrátor 702 SM TITRINO.
- Naplní se byreta KOH tak, aby ve spojovacích hadičkách nebyl žádný vzduch.
- Opláchnou se elektrody 2-propanolem, pak deionizovanou vodou otru titrační nádobku a přemístím ji na titrační stojan.
- Tlačítky se zvolí měřicí metoda a potvrdí.

Vyhodnocení

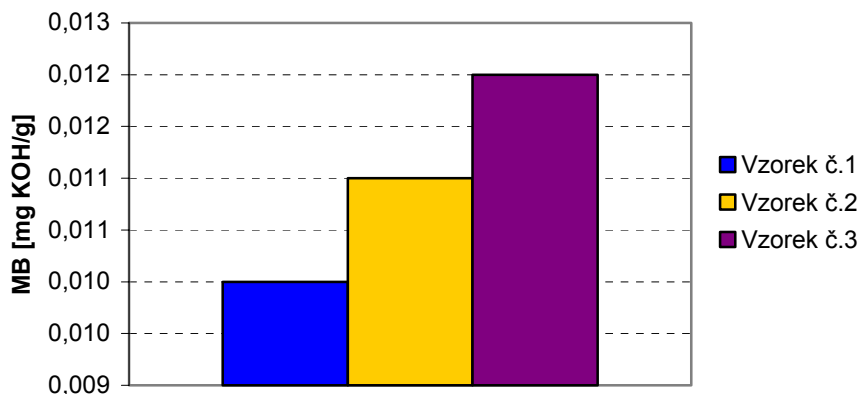
Měřicí přístroj vypočítá množství KOH podle vztahu 5:

$$\check{C}K = \frac{(V_1 - C_{03}) * C_{02} * C_{01}}{v_v} \quad (5)$$

Výsledek zkoušky je aritmetickým průměrem dvou měření. Výsledek se odečte z displeje měřicího přístroje viz tab. 6. [11] [3] [12]

Tab. 6. Číslo kyselosti izolačního oleje

Číslo vzorku	ČK [mg KOH/g oleje]
Vzorek č.1	0,010
Vzorek č.2	0,011
Vzorek č.3	0,012



Graf 6. Číslo kyselosti izolačního oleje

Naměřené hodnoty, které jsou zobrazeny v grafu 6 se pohybují od 0,010 do 0,012 KOH/g oleje. Je patrné, že nárůst je v jednotkách procent. Příčinou je chyba měření. Odstavení vakuového separátoru nemá na číslo kyselosti izolačního oleje vliv. Doporučená hodnota ČK je $< 0,08$ mg KOH/g oleje.

7.6 Stanovení ztrátového činitele, relativní permitivity, vnitřní rezistivity

Podstata zkoušky

Ztrátový činitel ukazuje na přítomnost rozpuštěných polárních a iontových složek v oleji. Ztrátový činitel je sumární hodnota a udává se v absolutní hodnotě.

Relativní permitivita pomáhá k určení stupně oxidačního zestárnutí oleje. Relativní permitivita je bezrozměrné číslo.

Vnitřní rezistivita indikuje přítomnost cizích iontových složek v oleji. V hodnotě vnitřní rezistivity se projeví také obsah vody v izolačním oleji. Hodnota vnitřní rezistivity se určuje v ohmmetrech. [12]

Potřebné zařízení a chemikálie

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Speciální Scheringův můstek typ 2821
- Regulátor teploty TETTEX Instruments 2967
- Topné hnízdo TETTEX Instruments 2903
- Indikátor teploty TETTEX Instruments

- Měřicí nádoba TETTEX Instruments
- Megaohmmetr se zdrojem stejnosměrného napětí s rozsahem do 1015 Ohm TETTEX typ 5476
- Stopky
- Přepojovač pro TETTEX 2821
- Chemikálie na čištění měrných kondenzátorů (toluen, benzín)

Postup měření ztrátového činitele a relativní permitivity

- a) Provede se vizuální kontrola měrného kondenzátoru, zda není poškozený.
- b) Před měřením musí být nádoby dobře promyté v rozpouštědle a dokonale vysušené. Umyté nádoby se uchovávají v exsikátoru se silikagelem. Při manipulaci s měrnými kondenzátory pracují v bavlněných rukavicích, aby se zabránilo styku s pokožkou.
- c) Měrná nádoba se připojí k měřicímu můstku a určí se ztrátový činitel a elektrická kapacita.
- d) Měření se provádí při třech předepsaných laboratorních teplotách. Při 20 °C, 70 °C a při 90 °C. Mezi prvním a druhým vzorkem je potřeba temperovat olej 90 minut a mezi druhým a třetím měření temperují vzorky 60 minut.
- e) Intenzita elektrického pole při měření vzorků izolačního oleje má být 2 kV.
- f) Ztrátový činitel a relativní permitivita se měří ve dvou dávkách jednoho vzorku izolačního oleje. Každý vzorek se měří v samostatné nádobce.

Postup měření vnitřní rezistivity

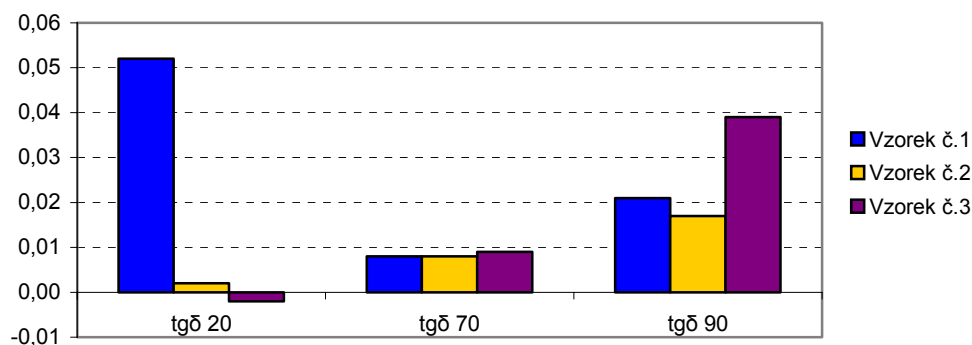
Měření vnitřní rezistivity se stanovuje na tomtéž vzorku izolačního oleje a ve stejné nádobce, ve které se měří ztrátový činitel. Po změření ztrátového činitele do obvodu přepojovače zapojím kabely pro měření vnitřní rezistivity a provedu změření odporu při intenzitě 0,25 MV/m po dobu 1 minuty. Rozdíl mezi jednotlivými měřeními nesmí přesahovat 35 % z vyšší naměřené hodnoty odporu. Měření a vyhodnocení vnitřního odporu izolačního oleje probíhá v mikroprocesorově řízeném přístroji automaticky. [8] [2] [12]

Vyhodnocení

Hodnoty ztrátového činitele měřených vzorků jsou v tab. 7. Graficky jsou hodnoty $\text{tg}\delta$ znázorněny v grafu 7. Hodnoty relativní permitivity jsou uvedeny v tab. 8, hodnoty vnitřní rezistivity vzorků uvádím v tab. 9.

Tab. 7. Hodnoty ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ při teplotě 20 °C, 70 °C a 90 °C

Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3
$\text{tg}\delta_{20}$	0,052	0,002	-0,002
$\text{tg}\delta_{70}$	0,008	0,008	0,009
$\text{tg}\delta_{90}$	0,021	0,017	0,039

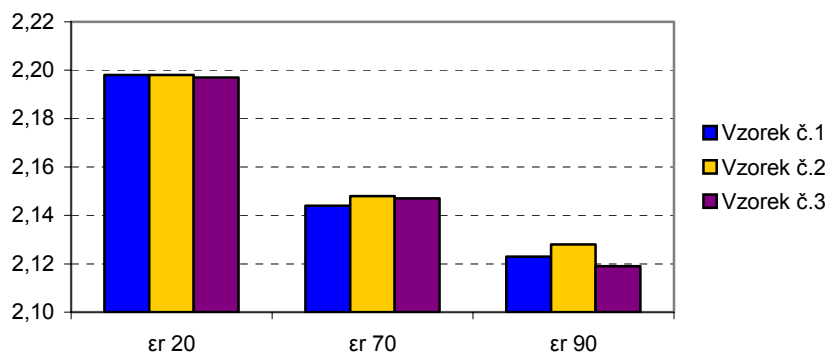


Graf 7. Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ při laboratorní teplotě.

Rozpuštěná voda a produkty vzniklých oxidací izolačního oleje ve vzorcích je důvodem nárůstu $\text{tg}\delta$. Rozpuštěné přítomné částice se chovají jako polární látky. Polární látky způsobují při průchodu elektrického proudu ohřev izolačního oleje a tím podporují další rozvoj korozního prostředí. Vlivem strmého vzrůstu teploty může vzniknout tepelný průraz stroje. Při měření $\text{tg}\delta_{20}$ u vzorku č.1 došlo k chybě měření. Doporučená hodnota ztrátového činitele pro izolační olej je $\text{tg}\delta_{90} < 7$.

Tab. 8. Hodnoty relativní permitivity při teplotě 20 °C, 70 °C a 90 °C

Relativní permitivita [$\times 10^{-2}$]	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3
ϵ_{r20}	2,198	2,198	2,197
ϵ_{r70}	2,144	2,148	2,142
ϵ_{r90}	2,123	2,128	2,119

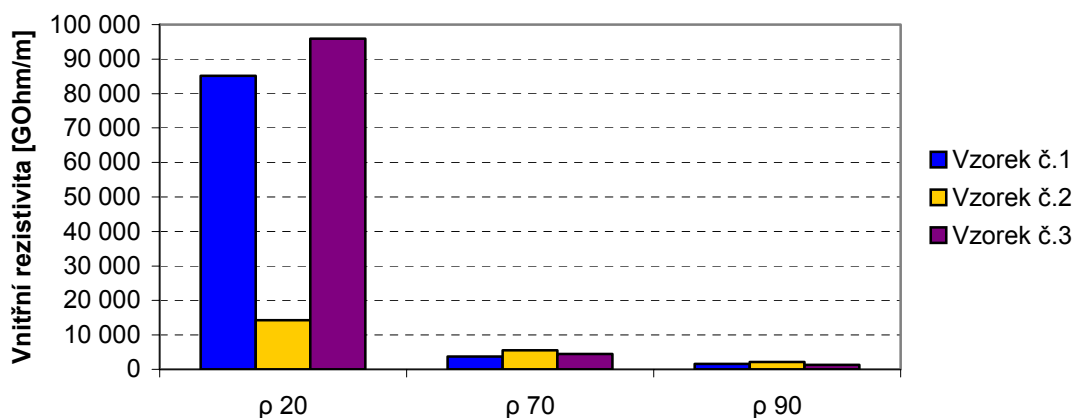


Graf 8. Relativní permitivita při laboratorní teplotě.

Z grafu 8 mohu stanovit, že odstavení transformátoru z provozu a vypnutí vakuového separátoru nemá na relativní permitivitu izolačního oleje podstatný vliv.

Tab. 9. Hodnoty vnitřní rezistivity izolačního oleje při teplotě 20 °C, 70 °C a 90 °C

Vnitřní rezistivita [$G\Omega m$]	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3
ρ_{20}	85 189,4	14 251,4	95 936,3
ρ_{70}	3 691,2	5 611,5	4 464,7
ρ_{90}	1 559,7	2 167,4	1 344,5



Graf 9. Hodnoty vnitřní rezistivity při laboratorní teplotě.

V grafu 9 je patrné, že odstavení vakuového separátoru může mít vliv na vnitřní rezistivitu izolačního oleje. U měření vnitřní rezistivity při 20 °C je hodnota u vzorku č.2 více než 6× menší než u ostatních vzorků. Vzhledem k tomu, že množství rozpuštěné vody v izolačním oleji je nižší než u ostatních měření, je důsledkem nízké

hodnoty vnitřní rezistivity vzorku č.2 nabitě koloidní látky a makromolekuly. Vlivem nízké hodnoty vnitřní rezistivity vzorku č.2 může vznikat korozivní prostředí uvnitř transformátoru. Doporučená hodnota vnitřní rezistivity pro izolační olej je ρ_{20} je $> 200 \text{ G}\Omega\text{m}$.

7.7 Stanovení hustoty izolačního oleje hustoměrem

Podstata zkoušky

Metoda stanovení hustoty spočívá v ponoření hustoměru do izolačního oleje a odečtení hodnoty na stupnici měřidla při dané teplotě. Výsledek měření je vstupní hodnotou pro měření mezipovrchového napětí olej-voda. [5] [12]

Potřebné pomůcky

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Hustoměr
- Odměrný válec

Postup měření

Provádějí se dvě souběžná měření při teplotě 20°C

- a) Vzorek oleje naliji do odměrného válce.
- b) Změřím teplotu vzorku oleje.
- c) Vložím hustoměr do odměrného válce s olejem.
- d) Po 2-3 minutách odečtu hodnotu hustoty oleje ze stupnice měřidla.

Vyhodnocení

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10. Hustota izolačního oleje

Číslo vzorku	ρ_{ol} [g/l]
Vzorek č.1	0,872
Vzorek č.2	0,872
Vzorek č.3	0,872

Hodnoty hustot izolačních olejů po provedení zkoušky byla shodná u všech zkoumaných vzorků.

7.8 Stanovení relativního mezipovrchového napětí olej-voda

Podstata zkoušky

Změnou mezipovrchového napětí se citlivě indikuje počátek stárnutí izolačního oleje. Při dlouhodobém poklesu mezipovrchového napětí dochází ke vzniku nepřípustných kalů v izolačním oleji. Podstatou zkoušky je modifikovaná metoda vážení kapek. Povrchové napětí se určuje na základě měření objemu kapek vyteklé z kapiláry do vzduchu a do zkoušeného vzorku oleje. Čím je vyteklá kapka z kapiláry větší, tím je hodnota povrchového napětí vyšší. [12]

Potřebné zařízení a chemikálie

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Automatický čítač kapek MNP-3
- Byreta, kolorimetrické válečky, silikonová hadička
- Laboratorní stojan
- Destilovaná voda
- Filtrační papír

Postup měření

- Voda i olej musí mít stejnou teplotu.
- Olej naliji do kolorimetrického válečku.
- Před ponořením kapiláry do oleje utřu ústí kapiláry do filtračního papíru.

- d) Zapnu čítač kapek vynuluji ho a v poloze olej odměřím 20 kapek vody.
- e) Odečtu objem vytekklé vody na byretě.
- f) Měření 2× zopakuji a z hodnot vypočtu aritmetický průměr.

Vyhodnocení

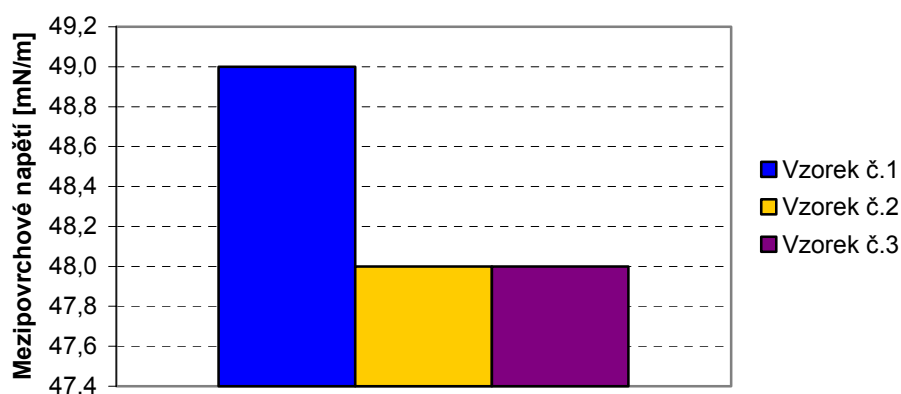
Mezipovrchové napětí σ_m (mN/m) určím ze vztahu 6. [3]

$$\sigma_{H_2O/olej} = V_{H_2O/olej} * (\rho_{H_2O} - \rho_{olej}) * \frac{\sigma_{H_2O/vzduch}}{\rho_{H_2O} * V_{H_2O/vzduch}} \quad (6)$$

Výsledek zkoušky stanovení relativního mezipovrchového napětí voda-olej je zobrazený v tab. 11 a grafu 10.

Tab. 11. Hodnoty mezipovrchového napětí voda-olej

Číslo vzorku	σ_m [mN/m]
Vzorek č.1	49
Vzorek č.2	48
Vzorek č.3	48



Graf 10. Hodnoty mezipovrchového napětí

Kritická hodnota mezipovrchového napětí pro vznik kalů v izolačním oleji je přibližně 25 mN/m. Příčinou snížení mezipovrchového napětí ve vzorku č.2 a č.3 může být například vznik organických látek nebo kyselin. Vypnutí vakuového

separátoru nemá na zkoumané vzorky vliv. Možnou příčinou stejných naměřených hodnot u vzorků č.2 a č.3 může být chyba měření. Doporučená velikost mezipovrchového napětí pro izolační olej je > 38 mN/m. Odstavení vakuového separátoru nemá na mezipovrchové napětí vliv.

7.9 Stanovení množství inhibitoru v izolačním oleji

Podstata zkoušky

Pomocí metody infračervené spektrometrie stanovím množství inhibitoru v izolačním oleji. Inhibitor je chemická látka, která je přítomná v izolačním oleji a zabraňuje vzniku oxidačních reakcí v systému olejového transformátoru. Měření probíhá automaticky pomocí mikroprocesorem řízeného infračerveného spektrometru. [12] [14]

Potřebné zařízení

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Poměrový záznamový spektrometr BUCK M500
- Osobní počítač s vyhodnovacím softwarem

Postup měření

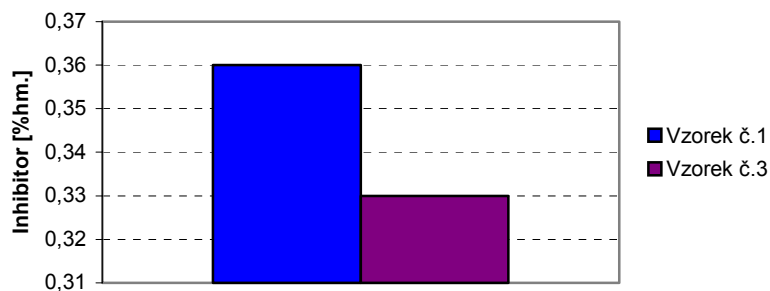
- a) 30 minut před měřením se zapne přístroj.
- b) Zapne se počítač.
- c) Vloží se vzorek zkoumaného izolačního oleje.
- d) Po ukončení analýzy se na monitoru PC zobrazí výsledek měření.

Vyhodnocení

V tab. 12 a grafu 11. jsou uvedené hodnoty množství inhibitoru získané při měření.

Tab. 12. Obsah inhibitoru v oleji

Číslo vzorku	Inhibitor [% hm.]
Vzorek č.1	0,36
Vzorek č.3	0,33



Graf 11. Množství inhibitoru v izolačním oleji

Množství inhibitoru ve vzorku č.3 je přibližně o 0,03 % menší než ve vzorku č.1. Úbytek může být způsobený tepelným namáháním nebo stárnutím izolačního oleje v transformátoru. Zkouška množství obsahu inhibitoru byla provedena v laboratoři E54 pouze u vzorku č.1 a vzorku č.3. Doporučené množství inhibitoru pro izolační olej v provozu je $> 0.15 \%$ hm. Odstavení vakuového separátoru nemá na zkoušku množství inhibitoru v izolačním oleji vliv.

7.10 Stanovení celkového obsahu plynů v oleji plynovou chromatografií

Podstata zkoušky

Pomocí vícenásobné vakuové extrakce s Toeplerovou vývěvou extrahují plyny rozpuštěné ve vzorku izolačního oleje. Získané plyny se následně analyzují plynovým chromatografem. Výsledkem analýzy je seznam množství plynů přítomných ve zkoumaném vzorku izolačního oleje. [12]

Potřebné zařízení a chemikálie

- Digitální teploměr a vlhkoměr typ GFTH 100
- Digitální barometr typ GDH11A
- Piraniho vakuometr typ VPR1
- Toeplerova pumpa Ströhlein Instruments
- Plynový chromatograf s detektory typ HP 5890 series II
- Integrátor typ 3396A
- Teploměr $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Injekční stříkačka

- Osobní počítač nebo integrátor

Postup měření

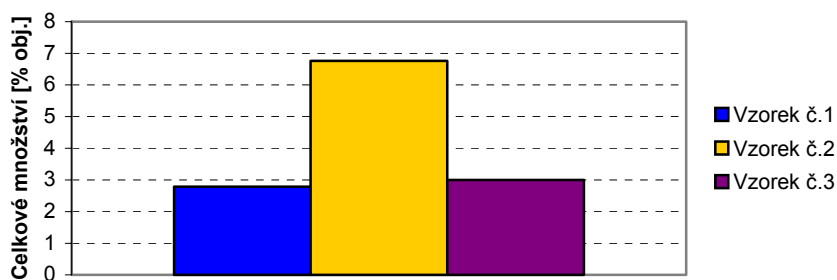
- Extrakce plynů z izolačního oleje Toeplerovou pumpou.
- Odebrání extrahovaného plynu z vývěvy.
- Vstříknutí odebraného vzorku plynu do plynového chromatografu.
- Zahájení měření chromatografu.
- Zpracování hodnot na počítači.

Vyhodnocení

Signály z detektorů jsou graficky zachycené na chromatogramu. Počítač podle získaných dat z chromatografu provede výpočet jednotlivých plynů přítomných v izolačním oleji. V tab. 13 je zobrazeno množství jednotlivých plynů přítomných v oleji po provedení výpočtu počítačem. [9]

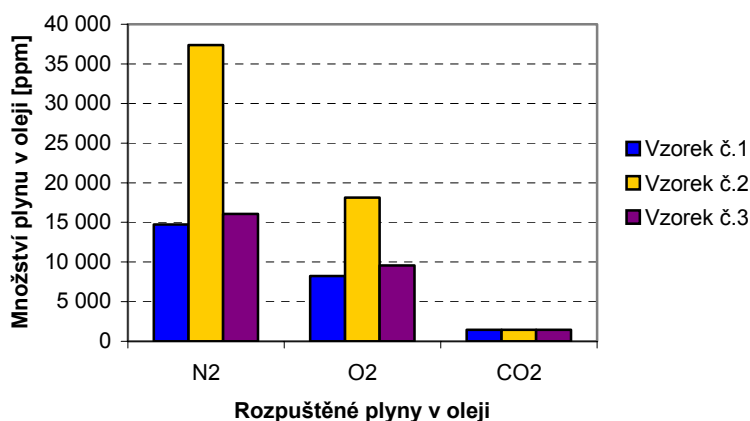
Tab.13. Množství plynu přítomné v izolačním oleji

Detekovaný plyn		Jednotka	Obsah plynu ve vzorku		
			Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3
Vodík	H ₂	μl/l	11,1	33,6	12,8
Oxid uhelnatý	CO	μl/l	18,1	88,4	19,7
Metan	CH ₄	μl/l	1,4	2,1	1,5
Etan	C ₂ H ₆	μl/l	0,7	1,2	0,9
Etylen	C ₂ H ₄	μl/l	2,1	3,4	3,2
Acetylen	C ₂ H ₂	μl/l	1,2	1,9	1,9
Propan	C ₃ H ₈	μl/l	31,5	4,8	5,3
Propen	C ₃ H ₆				
1-Buten	C ₄ H ₇	μl/l	14,6	37,8	25,1
Dusík	N ₂	μl/l	14 736,4	37 374,7	16 075,1
Kyslík	O ₂	μl/l	8 248,6	18 128,1	9 551,7
Oxid uhličitý	CO ₂	μl/l	454,5	444,6	461,5
Celkové množství uvolněných plynů		% objemu	2,7	6,7	3,0



Graf 12. Celkový objem rozpuštěných plynů v izolačním oleji

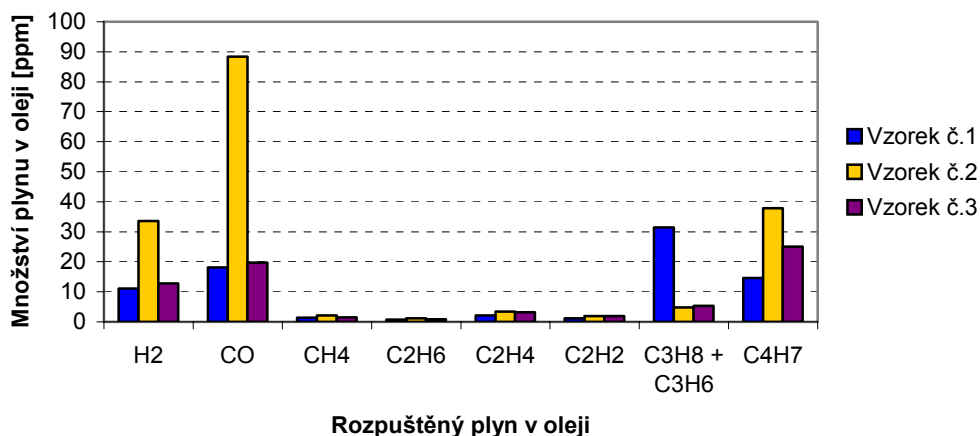
V grafu 12 je vidět, že izolační olej dobře absorbuje plyny. Důkazem je vzorek č.2. Celkové množství plynů ve vzorku č.2 je přibližně 2,2× vyšší než u vzorku č.1 a vzorku č.3. Vakuový separátor byl po celou dobu odstávky transformátoru vypnutý. Zvýšené množství plynů v izolačním oleji u vzorku č.2 může mít příčinu jednak v netěsnosti polohermetické nádoby transformátoru nebo oxidací povrchů uvnitř transformátoru. Výrazné ovlivnění vzorku č.2 elektrickým napětím vylučuji, protože byl transformátor vypnutý. Případné uvedení stroje pod napětí bylo jen krátkodobé. Doporučená hodnota množství celkových plynů v izolačním oleji je < 3 % obj.



Graf 13. Plyny v izolačním oleji s velkým objemem

Vzhledem k chemickému složení vzdušné atmosféry a dominantnímu množství plynu N₂ a O₂ u vzorku č.2 v grafu 13 soudím, že vlivem netěsnosti nádoby transformátoru kontaminuje vzdušná atmosféra izolační olej. U vzorků č.1 a č.3 je množství plynu N₂ a O₂ v provozních podmínkách na přípustné hodnotě. Množství plynu CO₂ u všech vzorků přibližně stejné. Proto mohu říct, že v transformátoru

nedochází k degradaci nebo přehřívání celulózy, která je důležitá pro bezporuchový provoz transformátoru.



Graf 14. Ostatní plyny přítomné v izolačním oleji

Doporučené hodnoty množství plynů v grafu 14 pro jednotlivé složky v izolačním oleji jsou pro [17]:

H ₂	>150 ppm
CH ₄ + C ₂ H ₄ + C ₂ H ₆	>800 ppm
C ₂ H ₂	>10 ppm
CO	>500 ppm

Vzhledem k doporučeným hodnotám zbytkových plynů, které jsou zobrazeny v grafu 14, je ve všech sledovaných vzorcích nízké množství. U vzorku č.1 a vzorku č.3 mohou považovat zbytkové hodnoty plynů za hodnoty provozní. Zvýšené množství plynů u vzorku č.2 jsou způsobené absorpcí vzdušné atmosféry. Změřené množství plynu CO u vzorku č.2 může být částečně důsledkem degradace celulózy. Vyšší hodnoty H₂ mohou působit korozivně na měděných površích vodičů transformátoru.

8 ZÁVĚR

Diplomová práce se věnuje studiu vlastností izolačního oleje za různých provozních podmínek.

V teoretické části jsou charakterizovány vlastnosti izolačních olejů. Jsou zde rozebrány příčiny, které mají vliv na kvalitativní vlastnosti izolačního oleje. V samostatných kapitolách vysvětlují mechanismus tvorby plynů v izolačním oleji a jejich následnou diagnostiku.

V praktické části jsem porovnával vlastnosti vzorku izolačního oleje transformátoru získaného za dlouhodobé odstávky stroje se vzorky izolačního oleje před odstávkou a po odstávce za běžného provozu stroje. Výsledky dílčích zkoušek jsem podrobně popsal ve vyhodnocení každé zkoušky.

Na základě měření jsem si prakticky potvrdil, že při odstaveném stroji vlivem polohermetické konstrukce nádoby transformátoru, izolační olej absorbuje vzdušnou atmosféru a vlhkost. Vzduch, voda a teplota negativně ovlivňují povrchy uvnitř nádoby, tím dochází ke zhoršování elektrických i mechanických vlastností transformátoru. Měřením se mi potvrdilo, že pro bezporuchové provozování stroje je důležité neustálé odlučování škodlivých par a plynů z izolačního oleje vakuovým separátorem. Vakuový separátor ovlivňuje nejen celkové množství plynů přítomných v izolantu, ale i vnitřní rezistivitu izolačního oleje.

Chci zdůraznit, že je nevhodné provádět ukvapené závěry o stavu transformátoru na základě jednoho měření. Pokud má být diagnostika transformátoru a kapalného izolantu objektivní, je nutné dlouhodobě sledovat všechny vnější příčiny změn a provádět výše popsané zkoušky pravidelně a periodicky.

Závěrem chci poděkovat jmenovitě olejové laborantce **Janě KYMLOVÉ** z ČEZ a.s., Kamýku nad Vltavou, vedoucí laboratoře olejů ORGREZ Praha, **Ing. Lence KOŠANOVÉ**, vedoucímu pracovníkovi TP elektro PVE Dlouhé Stráně p. **Antonínu KAŠPÁRKOVÍ** a PE **Martinu KOPECKÉMU** v PVE Dlouhé Stráně za odborný výklad problému, umožnění spolupráce při experimentech a vytvoření zázemí při tvorbě mé diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

- [1] ALTMANN, J.: *Provozní sušení transformátoru*, Elektro 1997 č.12. s. 425-429
- [2] ČEZ PN 00/05: *Profylaktika elektrických strojů netočivých - výkonové transformátory*
- [3] ČEZ PN 00/08: *Profylaktika minerálních izolačních izolačních olejů*
- [4] ČSN ISO 760: *Stanovení vody - Metoda Karl Fischera*
- [5] ČSN ISO 3675: *Ropa a kapalné ropné výrobky - Laboratorní stanovení hustoty hustoměrem*
- [6] ČSN ISO 60 156: *Izolační kapaliny. Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu.*
- [7] ČSN ISO 760: *Stanovení vody automatickou coulometrickou titrací Karl Fischera*
- [8] ČSN ISO 60 247: *Izolační kapaliny - Měření relativní permitivity, dielektrického ztrátového činitele ($\tan \delta$) a rezistivity při stejnosměrném napětí*
- [9] ČSN ISO 60 567: *Olejem plněná elektrická zařízení – Odběr vzorků plynů a oleje pro analýzu volných a rozpuštěných plynů*
- [10] ČSN ISO 60 814: *Izolační kapaliny - Olejem impregnovaný papír a lepenka.*
- [11] ČSN ISO 62 021-1: *Izolační kapaliny - Stanovení čísla kyselosti potenciometrickou metodou*
- [12] HANÁK, M.: *Studium vlastností transformátorového oleje*. Bakalářská práce VŠB Ostrava 2007, 54s.
- [13] HASSDENTEUFEL J., K. KVĚT A KOL.: *Elektrotechnické materiály*. Praha: SNTL, 860s. 1967 ISBN 04-540-67
- [14] IEC 666: *Zjišťování a stanovení specifikovaných přísad antioxidantů v izolačních olejích*
- [15] KOL. DR. MAZÁKA. Š.: *Elektrotechnický náučný slovník 6. zväzok Elektrické stroje a prístroje*. Bratislava: Alfa, 640 s. 1981 ISBN 63-120-81
- [16] URL:<<http://www.ars-altmann.com/news>
- [17] URL:<<http://www.esbrno.com>
- [18] URL:<<http://www.orgrez.cz>
- [19] URL:<<http://www1.siemens.cz>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1. Protokoly o měření izolačního oleje vzorku č.1

Příloha č. 2. Protokoly o měření izolačního oleje vzorku č.2

Příloha č. 3. Protokoly o měření izolačního oleje vzorku č.3

Příloha č. 4. Souhlas autorů k publikaci protokolů o měření